

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Московская Юлия Марковна

**ПРОГНОЗНЫЙ КОНТРОЛЬ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
ПОЛУЗАКАЗНЫХ КМОП СБИС НА СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА**

2.2.2 – электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники,
квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ» и в АО «ЭНПО СПЭЛС».

**Научный
руководитель:** **Бойченко Дмитрий Владимирович** - кандидат технических наук,
генеральный директор АО «ЭНПО СПЭЛС», доцент кафедры
«Электроника» НИЯУ МИФИ.

**Официальные
оппоненты:** **Шелепин Николай Алексеевич** -
доктор технических наук, профессор Федерального
государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский
университет «Московский институт электронной техники»;

Харитонов Игорь Анатольевич -
доктор технических наук, профессор Федерального
государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский
университет «Высшая школа экономики»;

Семенов Михаил Юрьевич -
кандидат технических наук,
руководитель научно-технического центра ООО «НМ-Тех».

Защита состоится 12 мая 2026 года в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного
совета МИФИ.2.05 Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: <https://ds.mephi.ru>
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.2.05,
кандидат технических наук



Леонид Николаевич Кессаринский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) с субмикронными проектными нормами, выполненные на основе отечественных КМОП базовых технологических процессов (БТП) реализуют широкую номенклатуру изделий – от субмикронных сложно-функциональных программно-управляемых устройств, содержащих цифровые, аналоговые и смешанные (аналого-цифровые и цифро-аналоговые) функциональные блоки до многочисленных цифровых устройств с микронными проектными нормами. Параметры технического уровня и эксплуатационные характеристики КМОП СБИС во многом определяют ключевые функциональные, технические и эксплуатационные характеристики программно-аппаратных комплексов объектов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), космических, атомных комплексов и других объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ).

Нормативными документами (НД) и типовыми сценариями применения таких СБИС предусмотрено требование эксплуатации в условиях радиационных воздействий (РВ) естественного и искусственного происхождения, что определяет необходимость обеспечения и оценки их радиационной стойкости (РС). Основные свойства РС СБИС закладываются на стадиях их проектирования и разработки, подтверждаются результатами радиационных испытаний (РИ), которые вносятся в технические условия (ТУ) на изделия.

С целью сокращения временных и финансовых затрат на разработку и производство изделий широко используются полузаказные (ПЗ) КМОП СБИС, в которых имеется общая полупроводниковая часть – база и индивидуальная для каждой «зашивки» разводка металлизации и контактов.

Полузаказные СБИС реализуются на базовых матричных кристаллах (БМК), база которых представляет собой матрицу КМОП вентилях и периферийные элементы ввода-вывода, и базовых кристаллах (БК), база которых включает фиксированный набор (библиотеку) типовых цифровых, аналоговых и смешанных функциональных блоков.

Полный информативный и достоверный контроль работоспособности и диагностика отказов КМОП СБИС в условиях РИ требует экспериментального определения значений всех параметров-критериев годности (ПКГ) одновременно, причем в критичных активных режимах работы, в диапазоне заданных рабочих

температур, испытательных воздействий (ИВ) и сопутствующих электромагнитных наводок и помех. Это сложная (методически, технически, логистически) комплексная и ресурсоемкая задача (длительность выполнения полного комплекса радиационных испытаний СБИС по типовым требованиям НД составляет от полугода до года).

РИ СБИС, как правило, проводят в специализированных испытательных лабораториях и центрах. При этом заложенные в микросхему и подтвержденные при разработке уровни РС должны быть обеспечены и гарантированы в условиях серийного производства с учетом всех возможных вариаций и разбросов как технологического процесса кристалльного производства, так и параметров исходных структур и материалов. При этом, желательно, по возможности, приблизить испытательные установки (ИУ) к микроэлектронному производству.

Важной тенденцией современного этапа развития микроэлектронных производств является переход от предприятий полного цикла к распределенному характеру создания микросхем с возможными разработкой изделий в фаблесс дизайн-центрах, контрактным изготовлением пластин с кристаллами микросхем на кремниевых фабриках, тестированием кристаллов в тестовых домах, корпусированием на сборочных производствах и реализацией потребителям, в т.ч. квалифицированными поставщиками.

При такой системе ухудшается информационное взаимодействие между участниками стадий жизненного цикла (ЖЦ) изделий, в частности затруднен доступ фабрики к данным радиационных исследований и испытаний микросхем при разработке и постановке на производство.

В то же время гарантии соответствия уровней РС готовых СБИС требованиям ТУ при производстве должны опираться на всю совокупность информации - о типовых значениях показателей РС, их запасах и разбросах, характерных для БТП, об изменениях БТП (в т.ч. вследствие нарушения цепочек поставок исходных структур и материалов), о результатах статистического контроля и мониторинга стабильности БТП, а также радиационных испытаний выборок образцов микросхем или тестовых структур из производственных партий.

Таким образом, диссертация **направлена на преодоление научного противоречия** между тенденцией увеличения стохастических вариаций параметров отечественных БТП микроэлектроники, оказывающих влияние на разброс

характеристик РС СБИС – с одной стороны, и отсутствием эффективных методов и методик производственного контроля РС КМОП СБИС – с другой.

Результат контроля РС производственной партии микросхем имеет прогнозный характер, так как данные контроля стабильности технологического процесса и испытаний малой выборки образцов по сокращенному набору ПКГ, режимов и условий работы распространяется на все образцы каждой контрольной производственной партии изделий в полном объеме заданных требований ТУ.

Актуальность темы исследования

Актуальность задач, решаемых в диссертации, определяется предъявленными к СБИС требованиями РС в соответствии с КГВС «Климат» и общими техническими условиями (ОТУ) на микросхемы для объектов ВВСТ, а также требованиями отраслевых НД, ТУ и моделями эксплуатации в объектах КИИ.

Важность и актуальность темы диссертации отражена в Государственном оборонном заказе, в «Перечне критических технологий», утвержденных указом Президента РФ 7.07.2011 №899 (Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов ВВСТ), в требованиях и положениях Указа Президента РФ от 30.03.2022 г. №166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».

Тема исследований соответствует приоритетным направлениям научно-технического развития и перечню важнейших наукоемких технологий, утвержденным Указом Президента РФ от 18.06.2024 г. №529 (п.11. Технологии микроэлектроники и фотоники для систем хранения, обработки, передачи и защиты информации).

Состояние исследований по тематике

Проведенный анализ состояния исследований по проблематике РС изделий микроэлектроники в России показал значительный вклад в этой области научной школы НИЯУ МИФИ. Различные аспекты моделирования, прогнозирования и методического обеспечения РС изделий микроэлектроники исследованы в работах д.т.н. Скоробогатова П.К., д.т.н. Чумакова А.И., д.т.н. Громова Д.В., д.т.н. Першенкова В.С., д.т.н. Попова В.Д., д.т.н. Никифорова А.Ю., д.т.н. Тельца В.А., д.т.н. Барбашова В.М., д.т.н. Зебрева Г.И., к.т.н. Согояна А.В., к.т.н. Елесина В.В., к.т.н. Улановой А.В., к.т.н. Давыдова Г.Г., к.т.н. Чукова Г.В., к.т.н. Борuzziной А.Б., к.т.н. Калашникова

О.А., к.т.н. Бобровского Д.В., к.т.н. Печенкина А.А., к.т.н. Усачева Н.А., к.т.н. Егорова А.Н., к.т.н. Маврицкого О.Б., к.т.н. Петрова А.Г., к.т.н. Герасимова Ю.М. и др.

Большой вклад в развитие методов моделирования радиационных эффектов и прогнозированию РС КМОП микросхем внесли ученые ВШЭ-МИЭМ чл.-корр. РАН, д.т.н. Петросянц К.О. и д.т.н. Харитонов И.А.

Проблемам моделирования и проектирования, развития методического обеспечения РС на стадии разработки посвящены работы ученых электронной отрасли - академика РАН д.т.н. Саурова А.Н., д.т.н. Шелепина Н.А., д.т.н. Эннса В.И., к.т.н. Денисова А.Н., к.т.н. Вавилова В.А., к.т.н. Машевича П.Р. и др. Важный вклад в развитие нормативно-методического обеспечения радиационных испытаний микросхем внесли д.т.н. Улимов В.Н, д.т.н. Таперо К.И., д.т.н. Бутин В.И., д.т.н. Зинченко В.Ф., к.т.н. Фигуров В.С., к.т.н. Хаустов В.В. , к.т.н. Герасимов В.Ф. и др.

Вместе с тем, абсолютное большинство выполненных ранее и проводимых в настоящее время научных исследований РС КМОП СБИС относятся к стадиям ЖЦ «Исследование и проектирование» и «Разработка». Исследования влияния технологических операций и разбраковки КМОП КНС СБИС на стадии производства выполнены к.ф.-м.н. Яшаниным И.Б., к.т.н. Согояном А.В. и к.т.н. Давыдовым Г.Г.

Настоящая диссертация направлена на развитие системы контроля РС в микроэлектронном производстве с учетом особенностей: (1) ПЗ КМОП СБИС, реализованных на отечественных БТП с проектными нормами до 0,18 мкм; (2) требований нового поколения КГВС «Климат-8» и (3) возникших логистических ограничений по обеспечению отечественных микроэлектронных производств исходными структурами и материалами в реалиях современного «гибридного мира».

Целью диссертации является исследование, разработка и развитие методов, методик и технических средств прогнозного контроля РС полузаказных КМОП СБИС на стадии их производства.

Указанная цель достигается решением следующих основных задач:

- теоретический анализ и экспериментальные исследования основных закономерностей радиационного поведения ПЗ КМОП СБИС на кремниевых, кремний-на-сапфире (КНС) и кремний-на-изоляторе (КНИ) структурах с учетом доминирующих механизмов радиационных отказов, широкого диапазона типовых и предельных уровней и разбросов характеристик РС;

- выбор рационального состава и структуры объектов контроля – типовых оценочных схем (ТОС) для прогнозного контроля РС производственных партий пластин (ППП) ПЗ КМОП СБИС;

- исследование и разработка научно-методического обеспечения прогнозного контроля РС ППП ПЗ КМОП СБИС на кремниевых, КНС и КНИ структурах;

- развитие методик 100%-й радиационной разбраковки кристаллов КМОП СБИС для БТП, обеспечивающих предельные уровни стойкости - на КНС и КНИ структурах в процессе производства;

- разработка общей методики статистического оценивания принадлежности контрольной ППП к генеральной совокупности ранее испытанных изделий на основе непараметрических критериев;

- развитие (адаптация) и апробация в условиях БТП отечественных предприятий экспериментальных комплексов на основе источников лазерного и рентгеновского ИВ, а также методик их калибровочного дозиметрического сопровождения применительно к задачам прогнозного контроля РС на стадии производства.

Научная новизна исследования

1 Научно обоснован выбор репрезентативных объектов испытаний – ТОС (в виде тестовых схем и/или полуфабрикатов микросхем) для прогнозного контроля РС ПЗ КМОП СБИС с учетом их функциональной и структурной однородности – на основе анализа априорной информации об уровнях и разбросах РС изделий и свойствах БТП, влияния характеристик исходных структур и технологических операций на РС.

2 Впервые разработаны метод и реализующая его общая методика прогнозного контроля РС ПЗ КМОП СБИС, устанавливающая порядок оценки соответствия контрольной ППП по результатам лабораторных испытаний малой выборки образцов ТОС и оценке их однородности относительно совокупности всех ранее полученных результатов испытаний таких ТОС, что позволяет распространить заключение по РС на контрольную ППП и сократить стоимость и сроки контроля в 2...3 раза.

3 Доработан и усовершенствован метод 100%-й радиационной разбраковки кристаллов ППП ПЗ КМОП СБИС с предельными требованиями по РС (на КНС и КНИ структурах) в части расширения (1) состава параметров-критериев отбраковки, что позволило учесть деградацию периферийных элементов, и (2) способов восстановления работоспособности образцов КНИ микросхем, что позволило

обеспечить надежную индивидуальную проверку РС каждого образца СБИС для особо ответственных применений.

4 Разработаны оригинальные метод и методика статистического оценивания однородности характеристик РС и принадлежности контрольной ППП к генеральной совокупности ранее испытанных эквивалентных изделий и производственных партий, отличающаяся применением непараметрических критериев в условиях отсутствия информации о характере распределения значений контролируемых параметров.

Практическая значимость

1 Определены количественные характеристики радиационного поведения, доминирующих механизмов радиационных отказов, зависимостей уровней РС ПЗ КМОП СБИС от вариаций характеристик исходных структур и операций технологического процесса.

2 Разработаны рекомендации по выбору состава и структуры репрезентативных тестовых объектов – ТОС для прогнозного контроля РС ПЗ КМОП СБИС в производстве, разработаны варианты топологии ТОС (оформлены 2 свидетельства о государственной регистрации топологии микросхем – приложение А).

3 Разработаны базовые алгоритмы для изделий разных категорий РС и методические рекомендации по прогнозируемому контролю РС, в т.ч. обоснованы критерии выбора вида и периодичности контроля партий пластин в серийном производстве.

4 Развита методические рекомендации по реализации в производстве 100%-й разбраковки кристаллов КМОП СБИС на КНС и КНИ структурах в части дополнения параметров-критериев отбраковки входными токами и по использованию различных видов восстановления параметров после отбраковки.

5 Предложен и обоснован подход к минимизации затрат на проведение испытаний, предусматривающий предварительный анализ однородности производственных партий изделий одного типа (типоминала), снижения коэффициента испытательной нагрузки, а также рационализацию процедур калибровочных испытаний применительно к рентгеновским и лазерным испытательным установкам.

6 Развита и адаптированы к условиям трех предприятий (АО «ЭНПО СПЭЛС», Филиал РФЯЦ ВНИИЭФ – «НИИИС им. Ю.Е. Седакова) и АО «Ангстрем» варианты

автоматизированных рабочих мест для прогнозного контроля РС ППП ПЗ КМОП СБИС.

7 Разработаны предложения в проекты НД в рамках программы стандартизации Технического комитета №167 «Программно-аппаратные комплексы для критической информационной инфраструктуры и программное обеспечение для них»:

- предварительный национальный стандарт ПНСТ 0911-2024 «Критическая информационная инфраструктура. Доверенные интегральные микросхемы и электронные модули. Общие положения», утвержден Госстандартом РФ, введен в действие с 01.04.2024;

- ГОСТ Р 72507-2026 «Критическая информационная инфраструктура. Доверенные интегральные микросхемы. Общие требования к производству»;

- ГОСТ Р «Критическая информационная инфраструктура. Доверенные интегральные микросхемы. Общие положения», проект представлен на утверждение в ТК167 в январе 2026 г.;

- ГОСТ Р «Критическая информационная инфраструктура. Доверенные интегральные микросхемы. Общие технические условия», проект представлен на утверждение в ТК167 в январе 2026 г.;

- ГОСТ Р «Критическая информационная инфраструктура. Доверенные интегральные микросхемы. Требования к жизненному циклу», проект представлен на утверждение в ТК167 в январе 2026 г.

8 Результаты диссертации, имеющие прикладное значение, внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС», АО «Ангстрем», Филиале РФЯЦ ВНИИЭФ – «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», АО «НИИМЭ», АО «Микрон», НПК «Технологический центр», АО «НПП «Миландр», АО «Дизайн-центр «Союз», «АО «Дизайн-центр «Кристалл», в учебный процесс НИЯУ МИФИ (приложение Б).

Результаты, выносимые на защиту

1 Научно-обоснованный порядок и критерии выбора репрезентативных объектов испытаний – ТОС (в виде тестовых схем и/или полуфабрикатов микросхем) для прогнозного контроля РС ПЗ КМОП СБИС в производстве на основе анализа (1) функциональной и структурной неоднородностей микросхем и априорной информации об (2) уровнях и разбросах РС по результатам испытаний (при ранее

проведенных разработке и серийном производстве), а также (3) о влиянии параметров исходных структур и технологических операций на РС.

2 Методическое обеспечение (метод, базовый алгоритм и основанная на нем общая методика) прогнозного контроля РС ПЗ КМОП СБИС с учетом особенностей категорий РС.

3 Доработанные метод и методики 100%-й производственной разбраковки кристаллов КМОП СБИС на КНС и КНИ структурах по дозовой стойкости на основе расширения состава контролируемых параметров-критериев отбраковки при рентгеновском воздействии и способов восстановления работоспособности (отжига).

4 Метод и реализующая его методика статистического оценивания однородности характеристик и принадлежности контрольной производственной партии к генеральной совокупности всех ранее испытанных партий на основе использования непараметрических критериев при отсутствии подтверждения нормального распределения результатов испытаний.

В ходе исследований использованы расчетно-экспериментальные **методы**:

- конструктивно-топологического и схемотехнического моделирования доминирующих радиационных эффектов в КМОП микросхемах на кремниевых, КНС и КНИ структурах;

- статистического оценивания принадлежности контрольной партии к генеральной совокупности ранее испытанных партий на основе непараметрических критериев (Краскела-Уоллиса или Манна-Уитни – в зависимости от числа выборок) в условиях отсутствия нормального закона распределения;

- моделирования реакции тестовых структур и микросхем на высокоэнергетичных радиационных установках тормозного излучения, ускорителях электронов, изотопных гамма установках, а также лазерных и рентгеновских источниках.

Достоверность результатов диссертации обеспечена:

- использованием аттестованных экспериментальных установок и методик исследований и их дозиметрического сопровождения, метрологической поверкой используемых приборов и оборудования;

- высокой статистической значимостью сравнительных экспериментальных данных, полученных на более чем двухстах производственных партиях;

- отсутствием отказов и рекламаций со стадий поставки и эксплуатации производственных партий и образцов ПЗ КМОП СБИС, в т.ч. в ходе РИ аппаратуры;
- хорошей сходимостью прогнозных и экспериментальных результатов РИ ТОС и микросхем на различных экспериментальных установках;
- широким внедрением и апробацией разработанных методов и методик прогнозного контроля на промышленных предприятиях, публикацией результатов диссертации в авторитетных научных изданиях и апробацией в докладах на ведущих научных конференциях, а также в проектах НД.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (г. Москва, 2007); «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем», (Зеленоград, 2016); «Сертификация ЭКБ» (г. Санкт-Петербург, 2017); «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур» (Нижегородская обл., 2013, 2015, 2017); «Радиационная стойкость электронных систем», (г. Лыткарино, 2017-2020, 2022); Российский форум «Микроэлектроника» (г. Алушта, ФТ «Сириус», Москва, 2016-2025), Международная конференция по микроэлектронике (MIEL), (г. Ниш, Респ. Сербия, 2017, 2019, 2025).

Основные результаты исследований опубликованы в 22 печатных работах, в т.ч. 8 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК по специальности 2.2.2, из них 4 за последние 4 года, получено 2 свидетельства о государственной регистрации топологий интегральных микросхем.

Оригинальность результатов диссертации подтверждена их публикациями в авторитетных научных изданиях, в т.ч. без соавторов, и докладами на ведущих научных конференциях, а также, двумя свидетельствами на топологии интегральных микросхем (тестовых схем).

Личный вклад автора в результаты работы заключается в:

- самостоятельно полученных и проанализированных результатах экспериментальных исследований и испытаний более 200 производственных партий пластин, изготовленных на ведущих отечественных предприятиях электронной промышленности;

- проведенном автором анализе особенностей более 100 различных вариантов тестовых схем и полуфабрикатов микросхем в ходе их радиационных исследований, в т.ч. параметров-мониторов, схем контроля технологии, зашивок БМК и библиотечных элементов БК, технологических тестовых структур;

- впервые разработанных базовых алгоритмах и основанной на них общей методике прогнозного контроля РС ПЗ КМОП СБИС в зависимости от категории стойкости, реализующих проверку соответствия РС малой выборки образцов контрольной партии с учетом априорной информации, полученной ранее на стадиях разработки и производства, а также РИ ТОС контрольной ППП;

- усовершенствовании методик 100%-й производственной разбраковки кристаллов по дозовой стойкости КМОП СБИС на КНС и КНИ структурах в части дополнения состава параметров контроля входными токами утечки и выбора рациональных вариантов восстановления работоспособности, позволяющих гарантировать соответствие микросхем предельным уровням требований по РС;

- разработке оригинальной методики оценки однородности производственных партий РС на основе использования непараметрических статистических методов оценивания в условиях отсутствия нормального распределения.

- результаты диссертации, имеющие прикладное значение, внедрены лично автором на ведущих отечественных микроэлектронных предприятиях (приложение Б).

Структура и объем диссертации

Текст диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем – 153 страницы. Диссертационная работа иллюстрируется 42 рисунками и содержит 15 таблиц. Список литературы содержит 90 позиций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, рассмотрена степень ее проработанности, проанализирована проблемная ситуация, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость исследования, изложены результаты, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации и внедрении результатов диссертации.

В первой главе выполнен обзор номенклатуры и БТП отечественных ПЗ КМОП СБИС для регулируемых рынков ВВСТ, космических и атомных комплексов, других сфер КИИ с требованиями по РС. Показано, что ПЗ КМОП СБИС могут быть реализованы на БМК и БК. Преимущества данной реализации заключаются в использовании общей основы активных полупроводниковых компонентов (FEOL) и заказных слоев металлизации и контактов (BEOL). Это не только значительно ускоряет процесс разработки конечного изделия и снижает её стоимость, но и позволяет получить высокую степень подобия радиационного отклика, допускает возможность контроля широкой номенклатуры подобных изделий по испытаниям общего репрезентативного объекта – типовой оценочной схемы.

ПЗ СБИС могут быть реализованы на отечественных КМОП БТП на кремниевых, КНС, КНИ структурах с проектными нормами от 1,5 мкм до 0,18 мкм на предприятиях АО «Микрон», НПК «Технологический центр», АО «Ангстрем», АО «Дизайн-центр «Союз» и АО «Дизайн-центр «Кристалл», в филиале РФЯЦ ВНИИФ – «НИИИС им. Ю.Е. Седакова».

Каждый БТП имеет естественную, статистически управляемую изменчивость операций. В многочисленных исследованиях установлено, что вариации производственного процесса оказывают наибольшее воздействие на дозовые и импульсные ионизационные эффекты, которые вызывают хорошо известные виды радиационных отказов, на исследование и контроль которых в процессе производства и были направлены основные усилия в диссертации.

Структурные повреждения слабо проявляются в КМОП СБИС на кремниевых, и еще меньше на КНС и КНИ структурах, а если такое влияние возникает, то оно должно быть выявлено и парировано на стадии разработки.

Аналогично обстоит ситуация с одиночными ионизационными эффектами от отдельных ядерных частиц – малые вариации БТП оказывают на них слабое влияние, а уровни отказов практически полностью определяются реализацией микросхемы на этапе разработки. Поэтому данные классы эффектов в диссертации не рассматриваются.

Мероприятия по обеспечению и контролю РС изделий микроэлектроники должны проводиться взаимосвязано на всех стадиях ЖЦ изделий – при разработке, производстве, поставке и эксплуатации. При этом на каждом этапе ЖЦ проводят

комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению и контролю РС, результаты которых «передаются» с предыдущего этапа в качестве исходной информации на последующий (текущий) этап и являются базой для развития и повышения эффективности мероприятий на этом и последующих этапах.

Практическая реализация базовой технологии обеспечения, прогнозирования и контроля РС изделий микроэлектроники во многом определяется целевой функцией изделия в аппаратуре и заданных требований по РС. В инженерной практике принято классифицировать РС ЭКБ по четырем категориям, определяемым сферами применения и требуемыми типовыми уровнями РС – от РС0 (минимальная) до РС3 (предельная):

- категория РС0 – изделия гражданского назначения (в т.ч. для регулируемых рынков КИИ) с потенциальной возможностью использования в оборонной технике, для которых требования РС в нормативных документах (НД) не регламентированы;

- категория РС1 – изделия общего оборонного назначения с базовыми (минимальными) требованиями РС (группы 1Ус...2Ус по ГОСТ РВ 20.39.414.2). При создании изделий данной группы применяют БТП без использования специальных конструктивно-топологических и схемно-топологических решений по обеспечению РС в ходе проектирования;

- категория РС2 – изделия с повышенным уровнем РС со значимыми требованиями по РС (3Ус...4Ус) в сочетании с высокими функциональными и технико-экономическими показателями. При создании изделий данной группы применяют стандартные БТП в совокупности со специальными библиотеками элементов, схемно-топологическими и конструктивными решениями по обеспечению РС при проектировании. Изделия данной группы обычно применяют в составе бортовой аппаратуры ракетно-космической техники и других оборонных комплексов;

- категория РС3 – изделия с максимальным уровнем требований (5Ус...6Ус). При создании изделий данной группы, как правило, применяют БТП на КНС и КНИ структурах в сочетании со специальными библиотеками, схемно-топологическими и конструктивными решениями по обеспечению РС. Максимально возможный уровень РС допускается обеспечивать даже за счет потери уровня функциональных и технико-экономических показателей. Подобные изделия применяются в составе стойкого ядра аппаратуры стратегических систем.

Свойства РС для каждой категории закладываются на стадии разработки, где выполняются работы по исследованию механизмов отказов и их парированию, а также проводится максимальный объем РИ. Задача стадии производства – обеспечить стабильный уровень РС изделий в соответствии с требованиями ТУ и исключить брак то РС.

На стадии поставки проводится сертификация изделий на соответствие требованиям модели применения в аппаратуре, а на стадии эксплуатации должно быть обеспечено соответствие режимов и условий применения изделий в аппаратуре требованиям ТУ, а также выполняется анализ радиационных отказов при их возникновении.

Диссертация ориентирована на разработку методического обеспечения стадии производства и не рассматривает мероприятия, проводимые на других стадиях ЖЦ.

Отмечено, что для современных отечественных микроэлектронных производств характерно нарушение сложившихся логистических цепочек поставок исходных структур и материалов, вынуждающих их приобретение по каналам параллельного импорта с одновременным восстановлением и освоением отечественных обеспечивающих производств в рамках импортозамещения. Сложившаяся ситуация обуславливает появление значимых различий в характеристиках, в т.ч. радиационных, между смежными производственными партиями микросхем.

Одновременно констатировано отсутствие эффективных методов оперативного контроля РС микросхем в производстве, позволяющих с минимальными издержками, обеспечить приемку ППП по РС. На преодоление этого научного противоречия применительно к ПЗ КМОП СБИС и направлена диссертация.

Прогнозный характер контроля РС в производстве определяется тем, что результаты испытаний тестовых объектов в выбранных режимах и условиях работы распространяют на всю производственную партию изделий во всех режимах и условиях их возможного применения согласно ТУ.

Сформулирована цель диссертации и реализующие ее научно-технические задачи работы. Предложены состав и общая структура (блок-схема, рис.1) реализации входного контроля РС ПЗ КМОП СБИС, рассмотрены ее основные блоки, разработка (развитие) и практическая реализация которых представлены в последующих главах. Таким образом, блок-схема по сути представляет структуру диссертации.

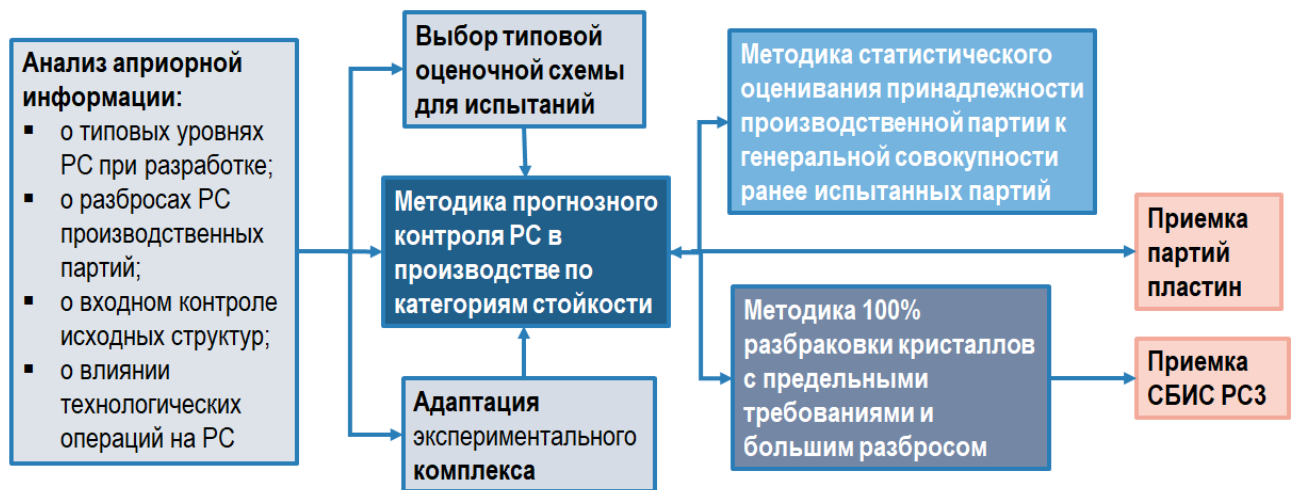


Рис. 1 – Блок-схема прогнозного контроля радиационной стойкости ПЗ КМОП СБИС

Вторая глава посвящена анализу априорной информации по РС, необходимой для реализации прогнозного контроля РС ПЗ СБИС, а также выбору рационального состава объектов контроля стабильности БТП на стадии производства – параметромониторы (ПМ) и схем контроля технологии (СКТ), а также ТОС.

ПМ – элементарные тестовые структуры (транзисторы, диоды, конденсаторы и др.) – предназначены для зондового контроля электрических параметров с целью оценивания стабильности БТП. ПМ размещают на дорожках реза и они не предназначены для измерений в условиях ИВ. Полученные автором результаты дозовой деградации тестовых транзисторов не позволили установить количественной корреляции радиационной чувствительности ПМ с уровнями РС СБИС.

Более информативными тестовыми схемами являются СКТ, которые размещены в виде отдельных тестовых кристаллов на пластине и содержат функциональные блоки из библиотеки данного БТП. СКТ предназначены для контроля нежелательных эффектов в процессе производства (тиристорного, горячих носителей, др.). СКТ допускают разварку в корпуса и потенциально позволяют анализировать дозовые и импульсные ионизационные эффекты, хотя в большинстве случаев в состав СКТ специальные блоки контроля РС не включены.

Обобщен большой массив испытательных данных, полученный за длительный период в испытательном центре АО «ЭНПО СПЭЛС» на этапе разработки, а также постановки и освоения в производство различных функциональных классов ПЗ СБИС для БТП КМОП с проектными нормами от 0,18 мкм до 1,5 мкм. Также обобщены и

проанализированы полученные автором экспериментальные данные по разбросам стойкости более 200 производственных партий, реализованных по указанным БТП.

Входной контроль исходных полупроводниковых структур является важной контрольной точкой БТП, особенно в случае, если к изделию предъявляются предельные требования РС, которые обеспечиваются выбором БТП на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) КНС и КНИ.

Представлены результаты оригинальных экспериментальных исследований влияния режимов (скорость) и условий (атмосфера - O_2 , H_2 , HCl) выращивания ГЭС кремния на ток потребления КМОП КНС СБИС и его деградацию при дозовых воздействиях. Также приведены сравнительные результаты дозовых деградаций КМОП КНС СБИС, изготовленных в однотипном технологическом процессе, но на исходных структурах КНС от разных поставщиков. Различия в режимах выращивания ГЭС кремния на диэлектрике привело к существенным (в 8 раз) различиям в дозовой чувствительности тока потребления микросхем. Показано, что флуктуации режимов легирования ГЭС КНС приводят к возникновению радиационно-индуцированных утечек по границе раздела кремний-сапфир после высокотемпературных технологических операций, вследствие эффекта проводимости кремния при уровне легирования ниже 10^{15} см^{-3} .

Следующий блок априорной информации содержит полученные автором данные по влиянию параметров технологических операций на РС микросхем. Экспериментально подтверждена гипотеза о критичном влиянии температурного режима операции окисления под затвор на дозовую стойкость КМОП СБИС. Так снижение температуры выращивания подзатворного окисла на 100°C привело более чем 10-кратному увеличению уровня дозового отказа.

Стабильность параметров технологических операций в производстве контролируют путем измерений электрических характеристик специальных тестовых структур – ПМ и СКТ, выход параметров которых за нормы сигнализирует о нестабильности и возможном браке БТП, но, как правило, без «привязки» к РС.

В диссертации разработаны различные варианты блоков контроля РС в составе СКТ с учетом данных, полученных на этапе разработки БТП и изделия. В их состав были включены наиболее информативные из библиотечных элементов, в т.ч. и из состава ПМ, и функциональные блоки, входящие в состав изделий.

Объектом испытаний при прогнозной оценке РС СБИС является ТОС – репрезентативная аппаратная модель-имитатор рабочей микросхемы, а если возможно – ряда микросхем. Для сложных, функционально неоднородных изделий на БК в качестве ТОС принимают тестовую схему в виде полного набора библиотечных и сложно-функциональных блоков (СФ-блоков) серии ПЗ СБИС или полуфабрикат контролируемой микросхемы.

В случае структурно однородных изделий на базе БМК высокая степень подобия радиационного отклика позволяет использовать ТОС в виде опорной (так называемой «нулевой») зашивки из типовых библиотечных элементов, объединенных в типовую схему включения. Оценка репрезентативности ТОС проводится на нескольких партиях микросхем на этапе освоения ПЗ КМОП СБИС в производстве.

В работе представлены результаты сравнительных РИ ТОС и вариантов зашивок БМК. Достоверность прогнозного контроля РС определяется полнотой априорной информации по типовым уровням РС, обеспечиваемых БТП с его правилами проектирования, библиотеками элементов и СФ-блоков, полученной по результатам характеристики и аттестации БТП.

Третья глава посвящена разработке базового алгоритма и основанной на нем общей методики прогнозного контроля РС ППП ПЗ КМОП СБИС с учетом особенностей категорий РС.

Система обеспечения и контроля РС в ходе освоения и серийного выпуска изделия складывается из следующих составляющих: статистического контроля и мониторинга БТП и контроля РС готовой продукции по ТОС (в виде тестовых схем или полуфабрикатов готовых изделий). Состав, общий объем и последовательность мероприятий в рамках системы мониторинга и статистического регулирования БТП и плана контроля изделия выбираются на основании:

- оценки стабильности БТП;
- предъявленных требований по РС в рамках категорий РС (РС1, 2, 3);
- анализа экспериментальных данных, полученных на этапе освоения изделия в БТП.

Изделия, к которым не предъявлены требования по РС (категория РС0) не требует прогнозного контроля РС. При этом радиационные испытания могут применяться для идентификации изделий (в т.ч. при контрактном производстве).

В работе продемонстрировано, что радиационный отклик микросхемы изменяется практически при любых изменениях БТП или схемотехники и топологии микросхемы, что позволяет использовать его в качестве идентификатора – физически неклонированной функции (ФНФ). Представлены экспериментальные данные по использованию радиационного отклика изделий для характеристики вариантов БТП и схемно-топологической реализации изделий. Вывод о принадлежности к одному изготовителю (или изделию) делают на основании результатов применения проверки однородности результатов методами математической статистики с заданным уровнем значимости.

Развитие методов радиационной характеристики БТП и микросхем требует значительного набора статистических экспериментальных данных с возможным привлечением для анализа технологий искусственного интеллекта, что является перспективным направлением дальнейших исследований.

Для изделий базовой категории стойкости (РС1) контроль партий пластин по РС проводится лишь в обоснованных случаях – при выявленной существенной нестабильности техпроцесса по результатам замеров ПМ, а также при наличии недекларируемых коррекций схемно-топологической реализации изделий в ходе серийного производства. Такие коррекции выявляются на этапе идентификации. Если возникает необходимость в проведении испытаний, то объектом контроля может быть СКТ или ТОС на основе опорной зашивки БМК или библиотеки БК.

В случае контроля производственных партий изделий категорий РС2 и РС3 важным моментом является наличие статистического контроля БТП и запасов по РС относительно установленных требований. Предлагается стабильность БТП по параметрам РС оценивать по однородности результатов контрольных ИВ (в т.ч. лазерного и рентгеновского) на выборку из ППП и их сравнения с данными, полученными на выборках их ранее проконтролированных партий. Вывод об однородности делают на основании результатов применения методов математической статистики с заданным уровнем значимости. Производственный прогнозный контроль РС ППП изделий категории РС2 предлагается организовать в форме и объеме алгоритма (рис. 2).

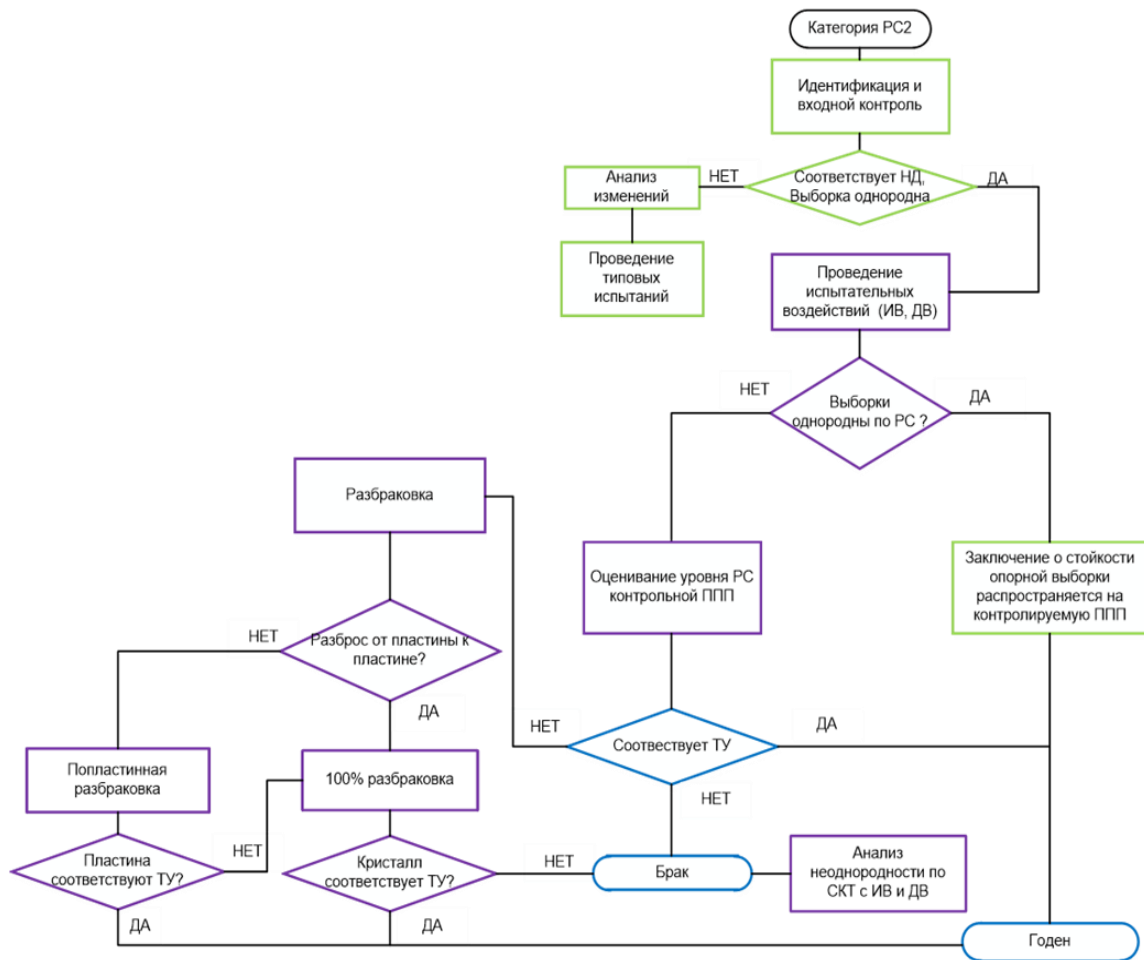


Рис. 2 – Блок-схема контроля изделий повышенного уровня стойкости (PC2)

Объектом контроля является ТОС (зашивка БМК или рабочая микросхема). При обнаружении расхождений между результатами текущего выборочного контроля и данными предыдущих испытаний делается вывод о наличии изменений. В этом случае для партии проводятся полноценные РИ. В случае однородности выборок заключение об уровне РС, полученное для ранее проконтролированных выборок, распространяется на контролируемую партию без РИ.

В случае использования лазерного и рентгеновского источников однородность выборок позволяет распространить коэффициенты калибровки, полученные ранее на контролируемую партию, что приводит к уменьшению сроков и стоимости контроля.

Если однородные выборки признаются частью общей генеральной совокупности, то суммарный объем выборки увеличивается за счет их объединения. При этом удастся уменьшить дозовую нагрузку путем снижения (до двух раз) значения нормативного коэффициента переоблучения для малых выборок.

Алгоритм производственного прогнозного контроля РС ППП изделий с предельными требованиями (категории РС3) представлен на рис. 3.

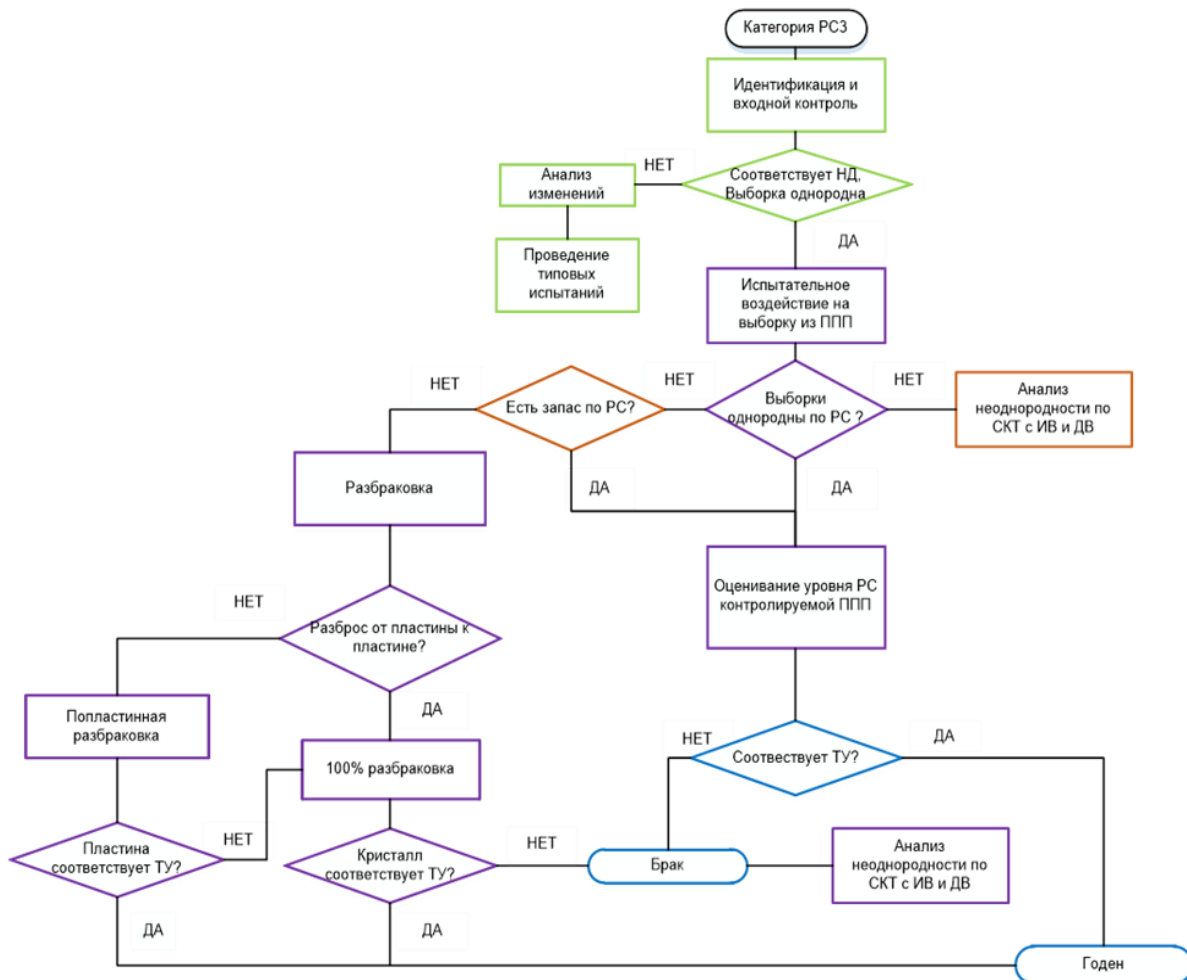


Рис. 3 – Блок-схема контроля изделий стойкости РС3

Объектом контроля является ТОС в виде рабочей СБИС. При обнаружении расхождений между результатами текущего выборочного контроля и данными предыдущих испытаний, делается вывод о наличии изменений, при этом должны проводиться РИ ТОС для контролируемой партии.

В случае однородности выборок и наличия запаса относительно уровней требований по РС для каждой ППП проводится оценивание уровня РС по результатам испытаний выборки из каждой производственной партии. Однородность выборок позволит снизить дозовую нагрузку за счет учета количества проконтролированных ранее образцов.

Неоднородность выборок и отсутствие запаса по РС (например, при использовании специального БТП с применением структур КНС и КНИ, которые

имеют разбросы характеристик по пластине) приводит к необходимости применять 100% разбраковку образцов по РС.

Предложения автора по развитию методики 100% разбраковки КМОП КНС микросхем заключались во включении в состав параметров разбраковки входных токов утечки ($I_{ЛН}$) в дополнение к току потребления, что позволяет в обоснованных случаях снизить уровень дозовой нагрузки, получить дополнительную информацию о различиях входных цепей микросхемы. Проведенные исследования показали, что характер дозовой зависимости токов потребления и токов утечки входных элементов идентичен и оба параметра могут использоваться для 100% разбраковки ПЗ КМОП СБИС на КНС структурах. Представлены алгоритм и порядок действий при проведении разбраковки.

Развита методика 100% разбраковки кристаллов КМОП СБИС на КНИ структурах в части использования различных видов восстановления микросхем после облучения и отбраковки потенциально нестойких изделий. Основным механизмом дозовой деградации КМОП КНИ СБИС является утечка по обратному паразитному МОПТ, для подавления которой используется подача внешнего напряжения на контакт к подложке. Установлено, что метод «радиационного отжига» (облучения с закороченными выводами) микросхем, применяемый для восстановления параметров КНС СБИС, оказался неэффективным для КМОП КНИ СБИС – выяснилось, что эффект восстановления характеристик в процессе радиационного отжига отсутствует.

В рамках работ по развитию методики разбраковки для ПЗ КМОП КНИ СБИС с предельными уровнями РС были проведены исследования фотоинжекционного отжига (на основе ультрафиолетового облучения) и высокополевой инжекции электронов из кремния в оксид (по механизму Фаулера-Нордгейма), однако эти методы не продемонстрировали ожидаемой эффективности.

В результате проведенных исследований были предложены три подхода к проведению разбраковки КМОП СБИС на КНИ структурах.

Первый подход предполагает высокотемпературную обработку кристаллов КМОП КНИ СБИС. При температуре выше 400°C наблюдается практически полный отжиг встроенного заряда. Восстановление характеристик имеет место независимо от режима облучения и наличия утечек скрытого окисла, но метод применим только для кристаллов в составе пластины до разварки в корпус.

Второй подход основывается на наблюдаемой экспериментально особенности дозовой деградации характеристик скрытого окисла. Обнаружено, что при уровне воздействия выше 500 крад наблюдается выраженное насыщение зависимости уровня напряжения на подложке, поддерживающего постоянное значение тока утечки. Это позволило предложить метод разбраковки корпусированных изделий без последующего восстановления характеристик микросхем, включающий этапы: (1) облучение в активном электрическом режиме до уровня 1 Мрад и (2) контроль годности изделий с учетом сужения поля допуска на критериальные параметры.

Третий подход основан на анализе начального темпа деградации зависимости $I_{cc}(D)$ (или $V_0(D)$) и экстраполяции зависимости к требуемому уровню РС. Данный подход предполагает возможность измерения зависимостей $I_{cc}(U_{sub})$. Основной трудностью при его применении является наличие отдельных «аномальных» образцов, радиационная чувствительность которых не может быть определена по начальному участку зависимости $I_{cc}(D)$. Такие образцы должны быть отбракованы до прогнозного анализа начальной радиационной чувствительности.

Четвертая глава посвящена разработке базовой методики прогнозного контроля РС и приемки ППП на основе анализа их однородности с применением методов математической статистики.

На первом этапе проводится анализ статистических распределений результатов испытаний на РС не менее трех последовательных производственных партий пластин, начиная с момента постановки изделия на производство.

На втором этапе определяется критичный параметр для оценки однородности.

При отсутствии параметрического отказа однородность выборок определяется по значениям радиационно-критичного ПКГ, при ИВ в соответствие с НД.

При наличии параметрического отказа однородность выборок определяется по уровню ИВ, при котором критичный ПКГ соответствует установленным нормам.

На третьем этапе проверяется однородность выборок и определение опорной выборки. Так как при контроле ППП, распределение критичного ПКГ не всегда подчиняется закону нормального распределения, то целесообразно использовать статистические критерии, свободные от предположений о виде рассматриваемого статистического распределения. Поэтому для определения однородности ППП предложено использовать непараметрические статистические критерии оценивания:

<p>Критерий Краскела-Уоллиса (для трех и более выборок)</p> $H = \left[\frac{12}{n(n+1)} \right] \sum_{j=1}^c \frac{T_j^2}{n_j} - 3(n+1)$ <p>N – общее количество испытуемых в объединенной выборке; n – количество испытуемых в каждой выборке; T – суммы рангов по каждой группе</p>	<p>Критерий Манна-Уитни (для двух выборок – опорной и контролируемой)</p> $U = (n_1 \cdot n_2) + \frac{n_x \cdot (n_x + 1)}{2} - T_x$ <p>n₁ – количество испытуемых в выборке 1; n₂ – количество испытуемых в выборке 2; T_x – большая из двух ранговых сумм; n_x – количество испытуемых в группе с большей суммой рангов.</p>
---	--

Если статистический тест Краскела-Уоллиса демонстрирует отсутствие значимых различий между тремя последовательными выборками партий, соответствующая установленному уровню достоверности (как правило, достоверность устанавливается на уровне 0,05), то выборки объединяются в одну. Полученная объединенная выборка является опорной и затем используется для оценки однородности признака в контролируемой ППП.

Так как впоследствии проверяется однородность между двумя выборками, то используется критерий Манна-Уитни.

Однородность является условием распространения априорных данных с опорной выборки на контролируемую. Это условие позволяет:

- применять при оценке РС ранее полученные коэффициенты калибровки для испытательных установок с использованием лазерного и рентгеновского излучений;
- учитывать определенные ранее уровни испытательного воздействия и нормы испытаний с учетом разбросов от партии к партии;
- распространить результаты оценки РС, полученные для опорной выборки на контролируемую.

На четвертом этапе проводится учет разбросов от партии к партии.

В случае использования источников лазерного и рентгеновского излучений необходимо определить разброс V от партии к партии путем учета изменчивости значений калибровочного параметра и коэффициентов калибровки, найденных для партий опорной выборки:

$V = \sigma/M$ – коэффициент вариации, где параметры M и σ есть предполагаемые среднее значение и стандартное отклонение генеральной совокупности.

$$V^2 \equiv \frac{\text{Var}(D_x)}{[E(D_x)]^2} = V_{D_\gamma}^2 + V_K^2 + V_{D_\gamma}^2 V_K^2$$

где V_{D_γ} – коэффициент вариации распределения предельной испытательной нагрузки, по умолчанию $V_{D_\gamma} = 0,25$; V_K – коэффициент вариации распределения коэффициента калибровки опорной выборки.

Тогда коэффициент дозовой нагрузки будет рассчитан с учетом вариации калибровочных параметров. Коэффициент увеличения радиационной нагрузки K_n определяется следующей формулой (рассматривается нормальный закон распределения):

$$K_n = \frac{M - z_p \sigma}{M - z_R \sigma} = \frac{1 - z_p V}{1 - z_R V}$$

где: Z_R и Z_P – квантили нормального распределения, отвечающие уровням вероятности R и P , соответственно. Параметр R – вероятность сохранения работоспособности изделия. При проведении испытаний ППП на РС статистический контроль отвечает следующим значениям параметров: $R = 0,95$; $\gamma = 0,9$.

Параметр P – нижняя граница доверительного интервала из соотношения:

$$P = (1 - \gamma)^{1/n},$$

где γ – доверительная вероятность, а n – объем контролируемой выборки.

На пятом этапе проводится определение однородности для контролируемой выборки ППП. Если образцы из каждой следующей контролируемой ППП оказываются однородными, то их включение в опорную выборку увеличивает ее размер. Это увеличение, в свою очередь, дает возможность уменьшить значение K_n .

Применение базовой методики позволяет сделать вывод о стабильности БТП, повысить достоверность прогнозного контроля РС на стадии производства, сократить затраты на проведение РИ.

Автором была проведена адаптация, апробация и внедрение экспериментальных комплексов в условиях трех предприятий – все они активно используются для прогнозного контроля РС ПЗ КМОП СБИС: в Филиале РФЯЦ «ВНИИЭФ» - «НИИИС им. Е.Ю. Седакова», АО «ЭНПО СПЭЛС» и АО «Ангстрем», рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Научно обоснован рациональный выбор репрезентативных объектов испытаний – ТОС для прогнозного контроля РС ПЗ КМОП СБИС на стадии производства на основе использования априорной информации, полученной на стадиях

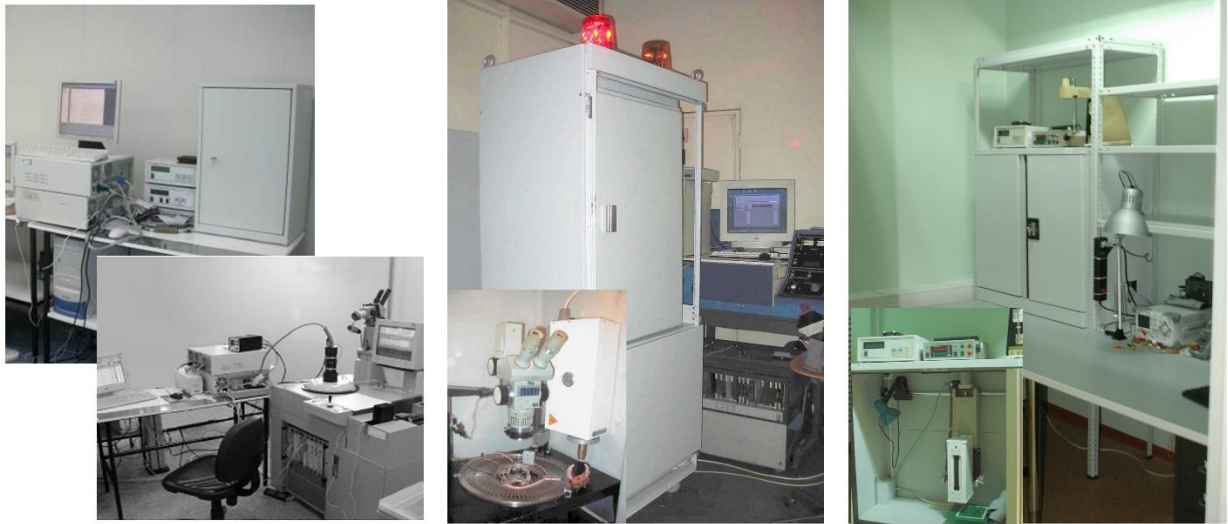


Рис.4 – Экспериментальные комплексы для контроля РС ПЗ КМОП СБИС

разработки и освоения изделия в производстве, ранее в ходе серийного производства, а также характерных особенностей БТП (влияния исходных структур и технологических операций на РС).

2 Впервые разработаны базовые алгоритмы и основанная на них общая методика прогнозного контроля РС производственных партий пластин ПЗ КМОП СБИС в зависимости от категории стойкости, реализующие проверку соответствия РС малой выборки образцов контрольной партии с учетом априорной информации, полученной ранее на стадиях разработки и производства, а также рациональных испытаний ТОС контрольной ППП, позволяющие сократить затраты на проведение испытаний.

3 Доработаны и усовершенствованы методики 100%-ой производственной разбраковки кристаллов по дозовой стойкости КМОП СБИС на КНС структурах на основе рентгеновского облучения до нормативного уровня в активном электрическом режиме и последующем радиационном отжиге в пассивном режиме в части дополнения состава параметров контроля, а также КМОП СБИС на КНИ структурах на основе сравнительного анализа и выбора вариантов восстановления микросхем, позволяющие гарантировать соответствие микросхем предельным уровням требований по РС.

4 Разработаны оригинальная методика и основанные на ней методические рекомендации по оценке стабильности производственных партий пластин на РС, отличающиеся использованием непараметрических статистических методов оценивания результатов испытаний в рамках контроля ППП в условиях отсутствия информации о характере распределения значения контролируемых параметров.

Таким образом, цель диссертации достигнута: решена важная научно-практическая задача по разработке и развитию методов, методик и технических средств прогнозного контроля РС полузаказных КМОП СБИС на кремниевых, КНС и КНИ структурах на стадии их производства - на основе использования априорной информации (о характеристиках РС и свойствах БТП), а также статистического анализа однородности ППП по результатам испытаний малой выборки типовых оценочных схем, что позволяет распространить заключение по РС на контрольную ППП и, таким образом, без потери его достоверности сократить сроки и стоимость контроля РС в производстве в 2...3 раза.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях из перечня ВАК по специальности 2.2.2:

1. **Московская Ю.М.**, Бойченко Д.В., Никифоров А.Ю. Использование статистических методов для повышения эффективности радиационного контроля производственных партий пластин в серийном производстве, Безопасность информационных технологий, 2025, Т. 32, № 3, С. 155-168 (2.2.2, К2).

2. **Московская Ю.М.**, Денисов А.Н., Никифоров А.Ю. Система обеспечения качества доверенного микроэлектронного производства, Безопасность информационных технологий. 2024. Т. 31. № 1. С. 42-53. (2.2.2, К2)

3. **Московская Ю.М.**, Бойченко Д.В. Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве II. Выбор объектов испытаний и статистическая обработка результатов контроля. Известия высших учебных заведений. Электроника. 2023. Т. 28. № 3. С. 337-350. (2.2.2, К1).

4. **Московская Ю.М.**, Бойченко Д.В. Прогнозный контроль радиационной стойкости микросхем в серийном производстве I. Система и алгоритмы реализации для различных категорий изделий, Известия высших учебных заведений. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 189-201. (2.2.2, К1).

5. Согоян А.В., Давыдов Г.Г., Артамонов А.С., Колосова А.С., Телец В.А., Никифоров А.Ю., Ожегин Ю.А., Каменева А.С., **Московская Ю.М.** Методика радиационной идентификации предприятия и характеристики технологии изготовления интегральных схем, Микрoэлектроника. 2017. Т. 46. № 4. С. 313-320. (2.2.2, К1).

6. **Московская Ю.М.**, Сорокоумов Г.С., Бобровский Д.В., Никифоров А.Ю., Уланова А.В., Денисов А.Н., Сницар В.Г., Жуков А.А. Рациональный состав типовой

оценочной схемы для контроля радиационной стойкости партий пластин базовых матричных кристаллов, Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2016. № 4. С. 153-157. (2.2.2, К2).

7. Яшанин И.Б., Давыдов Г.Г., Никифоров А.Ю., **Московская Ю.М.** Влияние нестабильности параметров технологического процесса изготовления КНД ИС на их радиационное поведение, Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 5 (97). С. 11-17. (2.2.2, К1)

8. Чистилин А.А., Романов А.А., **Московская Ю.М.**, Уланова А.В. Влияние имплантации ионов кремния и кислорода в слой гетероэпитаксиального кремния на сапфировой подложке на токи утечки n-канальных транзисторов КМОП ИС КНС технологии, Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 3. С. 224-229. (2.2.2, К1)

Публикации в прочих рецензируемых изданиях из перечня ВАК:

9. **Московская Ю.М.** Сравнительный анализ подходов к контролю радиационной стойкости ЭКБ в ходе ОКР и серийного производства, Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № S7 (107). С. 293-296. (К2).

10. Уланова А.В., Никифоров А.Ю., Телец В.А., Сокоян А.В., Яненко А.В., Боруздина А.Б., Бобровский Д.В., **Московская Ю.М.** Рациональный порядок и типовые ошибки записи в ТУ на изделие ЭКБ информации о радиационной стойкости, Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 298-300. (К2).

11. **Московская Ю.М.**, Никифоров А.Ю., Сницар В.Г. Рациональный методический подход к контролю радиационной стойкости партий пластин в процессе производства, Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 188-190 (К2).

12. **Московская Ю.М.** Контроль радиационной стойкости изделий микроэлектроники в процессе серийного производства: варианты и критерии выбора оптимального методического подхода, Наноиндустрия. 2019. № S (89). С. 197-201. (К2).

13. **Московская Ю.М.**, Никифоров А.Ю., Бобровский Д.В., Уланова А.В., Жуков А.А. Экспериментальная оценка влияния параметров критических операций типового КМОП техпроцесса на дозовую стойкость интегральных микросхем, Наноиндустрия. 2018. № S (82). С. 246-250. (К2).

14. **Московская Ю.М.**, Белостоцкая С.О., Федоров Р.А., Рудаков Г.А., Бобровский Д.В., Никифоров А.Ю., Уланова А.В., Сорокоумов Г.С. Модификация КМОП технологического маршрута для задач повышения дозовой стойкости, Наноиндустрия. 2017. № S (74). С. 206-212. (К2).

СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ

1 Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы RU 2019630005, 09.01.2019. Тестовая оценочная схема, содержащая набор базовых элементов и усилительных ФБ, предназначенная для апробации методик идентификации параметров моделей библиотеки КМОП КНИ технологического процесса/ Назарова Г.Н., Усачев Н.А., Никифоров А.Ю., Телец В.А., **Московская Ю.М.**

2. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы RU 2023630171, 03.10.2023. Базовые элементы и типовые функциональные блоки контроля стабильности базового технологического процесса / Балбеков А.О., **Московская Ю.М.**, Можаяев Р.К., Ермаков А.В.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БК – базовый кристалл
 БМК – базовый матричный кристалл
 БТП – базовый технологический процесс
 ВВСТ– вооружение, военная и специальная техника
 ГЭС– гетероэпитаксиальная структура
 ДИВ – дозовое испытательное воздействие
 ДРЭ – доминирующие радиационные эффекты
 ЖЦ – жизненный цикл
 ИИВ – импульсное испытательное воздействие
 ИУ – испытательная установка
 ИЦ – испытательный центр
 КИИ – критическая информационная инфраструктура
 КНИ – кремний на изоляторе
 КНС – кремний на сапфире
 НД – нормативные документы
 ОТУ – общие технические условия
 ПЗ КМОП СБИС – полузаказная КМОП СБИС
 ПКГ – параметры-критерии годности
 ПМ – параметрический монитор
 ППП – производственные партии пластин
 РВ – радиационное воздействие
 РИ – радиационные испытания
 РОМ – радиационно-ориентированное моделирование
 РОП– радиационно-ориентированное проектирование
 РОХ – радиационно-ориентированная характеристика
 РС – радиационная стойкость
 СБИС– сверхбольшая интегральная схема
 СКТ – структура контроля технологии
 СФБ – сложно-функциональный блок
 ТОС – типовая оценочная схема